

# 关于四震相方法的初步研究

马 波

(上海地震局)

## 摘 要

本文对四震相波速比方法较之常规波速比方法具有「放大」波速异常的作用,进行了较详细的讨论,认为四震相波速比是一种值得进一步研究和有待于以更多震例予以验证的方法。

## 序 言

波速比方法作为一种探测孕震过程的手段,已得到广泛使用。但是,在实际应用中还存在一些问题。例如,单台波速比值是分析纵横波的走时计算的:

$$\sqrt{\frac{S-[O]}{P-[O]}} \quad (1)$$

其中S为地震横波到时,P为地震纵波到时,[O]为地震的发震时刻。然而在天然地震中,[O]是无法直接测知的,一般均以著名的和达法外推求得。和达法外推所得的发震时刻与真正的发震时刻之间存在着不可忽视的误差。下表刊出多次直接测量爆破的起爆时刻,以及在严格统一各记录台站的时间服务系统的前提下,用各台的 $\bar{P}$ 波到时和 $\bar{S}-\bar{P}$ 值,按和达法外推求得发震时刻[O'],发现实测的起爆时刻与和达法外推所得的[O']之间误差达1秒量级。

发震时刻上的误差降低了单台波速比方法的精度。

目前地震台站的时间服务质量不太高,影响数据判读的精度;在过去相当长的一个时期内,各地震台站的时间服务系统不统一,引起的最大时差 $\Delta T = |UT_c - UT_1|$ ,可达0.9秒。这些因素也降低了单台波速比方法探测和监视地震孕育过程的效率。

为避免或减少常规波速比方法中的上述误差因素,近年来我国发展了一种四震相波速比方法:

$$r = \frac{S_{11} - \bar{S}}{P_{11} - \bar{P}} \quad (2)$$

其中 $S_{11}$ 为反射横波的到时, $\bar{S}$ 为直达横波到时, $P_{11}$ 为反射纵波到时, $\bar{P}$ 为直达纵波到

爆破日期	实测[O]	和达法[O']	记录台站	离散度σ	$\Delta[O] = [O] - [O']$
1981-1-21 马鞍山爆破	14-30-42.65	14-30-41.498	南京、溧阳、镇江、湖州、横湖	0.0104	1.182秒
1981-3-19 马鞍山爆破	12-00-04.36	12-00-05.239	巢湖、溧阳、无锡、湖州、横湖、天平山	0.0179	0.876
1981-4-4 马鞍山爆破	12-00-06.58	12-00-05.259	巢湖、加山、湖州、横湖、天平山	0.0703	1.321
1981-5-5 常熟爆破	21-00-05.76	21-00-04.562	天平山、余山、湖州、秦皇山、横湖	0.0490	1.198

•注：本次爆破的实测[O]数据由中科院地球物理所提供。

时。

四震相波速比方法曾对1976年7月28日唐山地震和1979年7月9日溧阳地震〔1〕、〔2〕、〔8〕作出较合理的解释。目前，四震相波速比法已为一些地震预报部门所试用。

文献〔2〕和〔3〕曾分别以(2)式对地震图资料进行分析，一致认为1979年7月9日溧阳六级地震之前有明显的趋势性波速异常存在。如果以单台波速比方法：

$$\left[ \begin{array}{l} \text{直} \\ \text{反} \end{array} \right] = \frac{S - [O]}{P - [O]}, \quad \left[ \begin{array}{l} \text{直} \\ \text{反} \end{array} \right] = \frac{S_{11} - [O]}{P_{11} - [O]}$$

对相应的地震图资料进行分析和计算(虽计算中的[O]不是和达法外推的[O']，而是根据

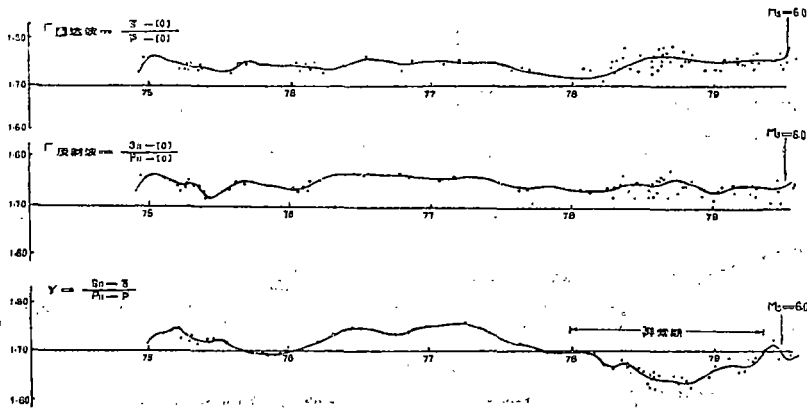


图1

爆破现场范围和距爆破点仅六公里远的马鞍山地震台记录的初至资料反演所得的[O])，计算结束却表明不存在明显的波速异常(图1)。这就有必要进一步从理论上对常规的单台波速比方法与四震相法之间，即(2)与(1)式之间的变化大小进行探讨和分析。本文便是这一研究的初步结果。

### 原理

当所监视的地区无地震孕育时，直达波与反射波的常规的单台波速比值按下式计

$$1) r = \frac{S^* - \bar{S}}{P^* - \bar{P}} \text{形式亦属四震相法，其中 } S^* \cdot P^* \text{ 为康腊面上的绕射波震相到时。}$$

算：

$$\left. \begin{array}{l} \rightarrow \\ \text{直达波} \end{array} \right\} = \frac{\bar{S} - [O]}{\bar{P} - [O]} \quad (3)$$

$$\left. \begin{array}{l} \rightarrow \\ \text{反射波} \end{array} \right\} = \frac{S_{11} - [O]}{P_{11} - [O]} \quad (4)$$

四震相法仍按下式计算：

$$r = \frac{S_{11} - \bar{S}}{P_{11} - \bar{P}} \quad (2)$$

(3)和(4)式有一共同的特点，分子和分母均为各相应震相到时减去一共同的参数—— $[O]$ ，所以(3)、(4)式在物理意义上是不同的。以常用的地震学符号表示：

$$t_{S_{11}} = S_{11} - [O], \quad t_{\bar{S}} = \bar{S} - [O],$$

$$t_{P_{11}} = P_{11} - [O], \quad t_{\bar{P}} = \bar{P} - [O].$$

又令  $a = S_{11} - \bar{S}$ ,  $b = P_{11} - \bar{P}$ ，则(3)、(4)和(2)式可写成：

$$\left. \begin{array}{l} \rightarrow \\ \text{直达波} \end{array} \right\} = \frac{t_{\bar{S}}}{t_{\bar{P}}},$$

$$\left. \begin{array}{l} \rightarrow \\ \text{反射波} \end{array} \right\} = \frac{t_{S_{11}}}{t_{P_{11}}}$$

$$r = \frac{a}{b},$$

在震中距约为90公里全反射距离上能保证上述四个震相清晰易辨，此时  $t_{S_{11}} \sim 31$ 秒， $t_{P_{11}} \sim 27$ 秒， $a \sim 4$ 秒， $t_{\bar{S}} \sim 19$ 秒， $t_{\bar{P}} \sim 16$ 秒， $b \sim 2.3$ 秒。显然  $t_{S_{11}}, t_{\bar{S}} \gg a$ ,  $t_{P_{11}}, t_{\bar{P}} \gg b$ ，且  $\frac{a}{t_{S_{11}}} \sim 0.129$ ,  $\frac{a}{t_{\bar{S}}} \sim 0.148$ 。

当所监视的地区有地震孕育过程发生，且孕震体位于地壳之中，则该孕震体可能位于反射波路径上，也有可能位于直达波路径上；同时，亦有可能既位于反射波的路径上又位于直达波路径上。这样便可能对反射纵波和直达纵波的走时影响各有不同（因孕震过程对横波影响甚微，故在此对反射横波和直达横波的走时影响忽略不计）。

设孕震过程使反射纵波走时增加  $\Delta t_1$ ，使直达纵波走时增加  $\Delta t_2$ ，则

$$\left. \begin{array}{l} \rightarrow \\ \text{直达波} \end{array} \right\} = \frac{\bar{S} - [O]}{(\bar{P} + \Delta t_2) - [O]} = \frac{t_{\bar{S}}}{t_{\bar{P}} + \Delta t_2} \quad (3')$$

$$\left. \begin{array}{l} \rightarrow \\ \text{反射波} \end{array} \right\} = \frac{S_{11} - [O]}{(P_{11} + \Delta t_1) - [O]} = \frac{t_{S_{11}}}{t_{P_{11}} + \Delta t_1} \quad (4')$$

$$r' = \frac{S_{11} - \bar{S}}{(P_{11} + \Delta t_1) - (\bar{P} + \Delta t_2)} \quad (2')$$

由(3')式

$$\frac{1}{\underbrace{\quad}_{\text{直达波}}'} = \frac{1}{\underbrace{\quad}_{\text{直达波}}} + \epsilon$$

其中  $\epsilon = \frac{\Delta t_2}{t_{\bar{S}}} > 0$ ,

由(4')式

$$\frac{1}{\underbrace{\quad}_{\text{反射波}}'} = \frac{1}{\underbrace{\quad}_{\text{反射波}}} + \theta$$

其中  $\theta = \frac{\Delta t_1}{t_{S_{11}}} > 0$ ,

由(2')式

$$\frac{1}{r'} = \frac{1}{r} + \eta$$

其中  $\eta = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{a}$  上述三式又可写为:

$$\frac{1}{\underbrace{\quad}_{\text{直达波}}'} - \frac{1}{\underbrace{\quad}_{\text{直达波}}} = \epsilon \quad (5)$$

$$\frac{1}{\underbrace{\quad}_{\text{反射波}}'} - \frac{1}{\underbrace{\quad}_{\text{反射波}}} = \theta \quad (6)$$

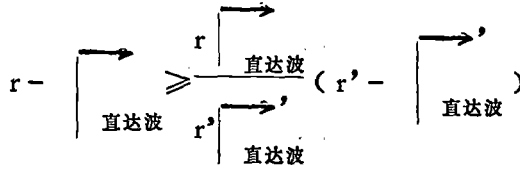
$$\frac{1}{r'} - \frac{1}{r} = \eta \quad (7)$$

孕震体的形状和深度位置的不同对走时的影响也不同,可分下列多种情况进行讨论:

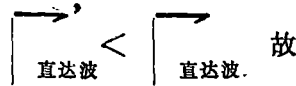
### 一、与直达波比较

1. 当  $\Delta T_1 \geq \Delta t_2 (1 + \frac{a}{t_{\bar{S}}})$ , 即  $\eta \geq \epsilon$ , 此时孕震体的形状和深度位置使得孕震过程对反射纵波的影响甚大于对直达纵波的影响(图2)。便有

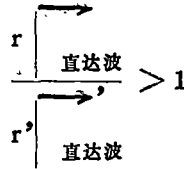
$$\frac{1}{r'} - \frac{1}{r} \geq \frac{1}{\underbrace{\quad}_{\text{直达波}}'} - \frac{1}{\underbrace{\quad}_{\text{直达波}}}$$



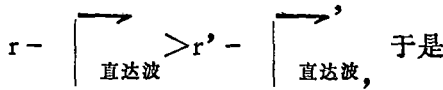
因为  $\Delta t_1 > \Delta t_2$ , 则  $r' < r$ ,



故



必有



于是

$$\Delta r > \Delta \quad \text{直达波} \quad (8)$$

(8)式表明, 即使孕震体位于直达波路径上, 又位于反射波路径上, 只要孕震体的形状和深度位置使得孕震过程对反射纵波的影响甚于直达纵波, 四震相波速比方法便有「放大」波速异常的作用。

2. 当  $\Delta t_2 (1 + \frac{a}{t_s}) > \Delta t_1 > \Delta t_2$ , 即  $e > \eta > 0$ , 此时孕震体的形状和深度位置使得孕震过程对反射纵波的影响略甚于对直达纵波的影响 (见图 3), 便有

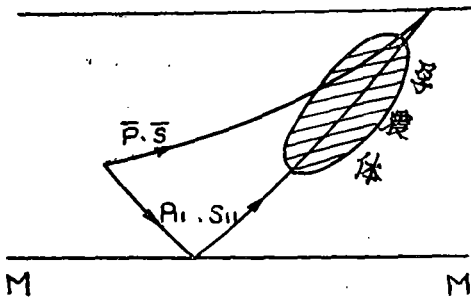


图 2

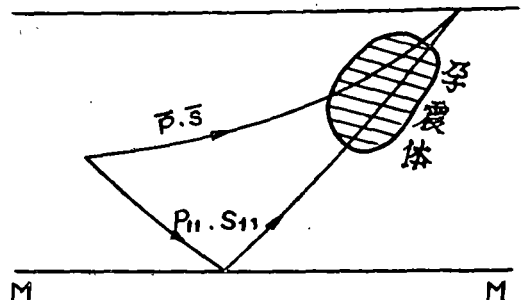
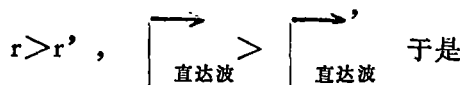


图 3

$$\frac{1}{\text{直达波}} - \frac{1}{\text{直达波}} > \frac{1}{r'} - \frac{1}{r} > 0 \quad (9)$$

则



于是

$$\frac{\begin{array}{c} \text{直达波} \\ \cdot r \end{array}}{\begin{array}{c} \text{直达波} \\ \cdot r' \end{array}} > 1$$

由(9)式

$$\begin{array}{c} \text{直达波} \\ \cdot r \end{array} > \begin{array}{c} \text{直达波} \\ \cdot r' \end{array} \left( \begin{array}{c} \text{直达波} \\ \cdot r' \end{array} \right)$$

则

$$\boxed{\Delta > \Delta r} \tag{10}$$

(10)式表明孕震过程对反射纵波的影响略甚于直达纵波时，四震相法便无「放大」作

用。但是，因  $\frac{a}{t_s} \sim 0.148$ ，故出现的可能较小。

3. 当  $\epsilon > \eta = 0$ ，即  $\Delta t_1 = \Delta t_2$ ，此时孕震体的形状和深度位置使得孕震过程对直达纵波和反射纵波的影响相等（见图4），便有

$$\frac{1}{\text{直达波}} - \frac{1}{\text{直达波}} > \frac{1}{r'} - \frac{1}{r} = 0$$

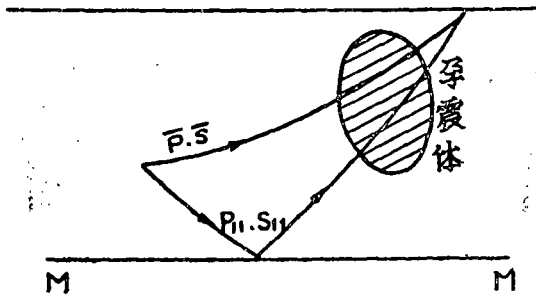


图4

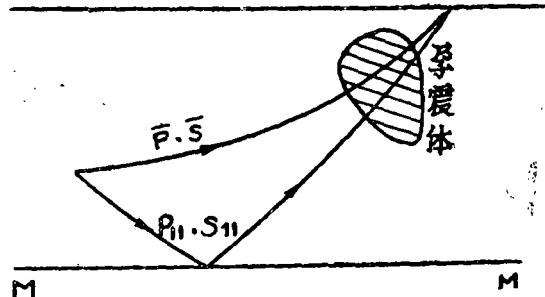


图5

则有

$$\begin{array}{c} \text{直达波} \\ \cdot r \end{array} > \begin{array}{c} \text{直达波} \\ \cdot r' \end{array}$$

$$\boxed{\Delta r = 0}$$

表现为正异常

$$\tag{11}$$

(11)式表明在此情况下，四震相法不能反映波速异常信息。但是， $\Delta t_1 = \Delta t_2$  属很特殊的情况，出现的可能性更小。

4. 当  $\Delta t_2 > \Delta t_1 > \Delta t_2 \left(1 - \frac{a}{t_s}\right)$ ，即  $0 > \eta > -\epsilon$ ，此时孕震体的形状和深度位置使得孕

震过程对反射纵波的影响略小于对直达纵波的影响（见图 5）  
则有

$$0 > \frac{1}{r'} - \frac{1}{r} > \frac{1}{\text{直达波}} - \frac{1}{\text{直达波}}$$

$$\left[ \begin{array}{c} \text{直达波} \\ -r' > \frac{\text{直达波}}{r} \end{array} \right] > \left[ \begin{array}{c} \text{直达波} \\ -r \end{array} \right] \quad (12)$$

因为  $\eta = \frac{1}{r'} - \frac{1}{r} < 0$ ，则  $r' > r$ ，表现为正异常，  
又因

$$\epsilon = \frac{1}{\text{直达波}} - \frac{1}{\text{直达波}} > 0,$$

则

$$\left[ \begin{array}{c} \text{直达波} \\ > \end{array} \right] \left[ \begin{array}{c} \text{直达波} \\ > \end{array} \right], \text{ 表现为负异常, 故}$$

$$\frac{\left[ \begin{array}{c} \text{直达波} \\ r' \end{array} \right]}{\left[ \begin{array}{c} \text{直达波} \\ r \end{array} \right]} > 1$$

由(12)式可得

$$\boxed{\Delta \left[ \begin{array}{c} \text{直达波} \\ > \end{array} \right] > |\Delta r|} \quad (13)$$

(13)式表明孕震过程对反射纵波的影响略小于对直达纵波的影响时，四震相法无「放大」波速异常的作用。同理，因  $\frac{a}{t_s} \sim 0.148$ ，故出现的可能较小。

5. 当  $\Delta t_1 < \Delta t_2 \left(1 - \frac{a}{t_s}\right)$ ，即  $\eta < -\epsilon$ ，此时孕震体的形状和深度位置使得孕震过程对反射纵波的影响甚小于对直达纵波的影响（见图 6），则有

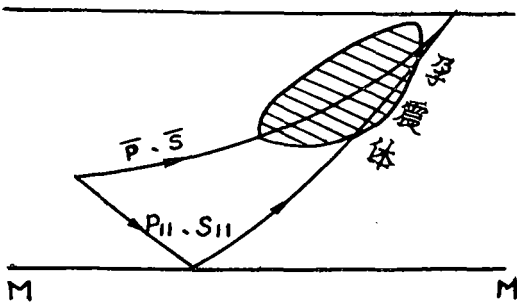


图6

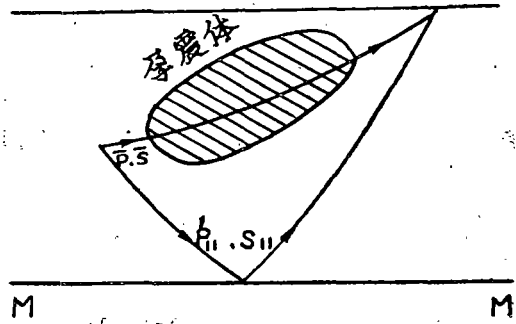


图7

$$\frac{1}{r'} - \frac{1}{r} < \frac{1}{\text{直达波}} - \frac{1}{\text{直达波}}$$

可得

$$\frac{r'}{\text{直达波}} (r - \text{直达波}) < (r' - \text{直达波})$$

又因  $\Delta t_2 > \Delta t_1$   $r' > r$  表现为正异常, 则

$$\frac{r'}{\text{直达波}} > 1,$$

则

$$|\Delta r| > \Delta \text{ 直达波} \tag{14}$$

(14)式表明孕震过程对反射纵波的影响甚小于对直达纵波的影响时, 虽四震相法表现为正异常, 但仍有「放大」波速异常的作用。

6. 当  $\Delta t_1 = 0$ , 即  $\eta = -\frac{\Delta t_2}{a}$ , 此时孕震体的形状和深度位置使得孕震过程仅对直达纵波有影响, 而对反射纵波无影响(见图7),

则

$$\text{直达波} = \frac{t_s}{t_P + \Delta t_2} \tag{3''}$$

$$r' = \frac{a}{b - \Delta t_2} \tag{2''}$$

由(3'')式



$$\frac{1}{\left[ \begin{array}{c} \rightarrow \\ \text{直达波} \end{array} \right]'} = \frac{1}{\left[ \begin{array}{c} \rightarrow \\ \text{直达波} \end{array} \right]} + \varepsilon$$

其中

$$\varepsilon = \frac{\Delta t_2}{t_F} > 0,$$

由(2'')式

$$\frac{1}{r'} = \frac{1}{r} + \eta'$$

其中

$$\eta' = -\frac{\Delta t_2}{a} < 0,$$

因  $\varepsilon > 0$ , 则  $\left[ \begin{array}{c} \rightarrow \\ \text{直达波} \end{array} \right]' > \left[ \begin{array}{c} \rightarrow \\ \text{直达波} \end{array} \right]$ 。这表明常规波速比表现为负异常；因  $\eta' < 0$ , 则  $r' > r$ 。这表明四震相法表现为正异常。由(3)和(3'')式

$$\frac{\left[ \begin{array}{c} \rightarrow \\ \text{直达波} \end{array} \right]'}{\left[ \begin{array}{c} \rightarrow \\ \text{直达波} \end{array} \right]} = 1 + \frac{\Delta t_2}{t_F}$$

可得

$$\left[ \begin{array}{c} \rightarrow \\ \text{直达波} \end{array} \right] - \left[ \begin{array}{c} \rightarrow \\ \text{直达波} \end{array} \right]' = \left[ \begin{array}{c} \rightarrow \\ \text{直达波} \end{array} \right]' \cdot \frac{\Delta t_2}{t_F} \quad (15)$$

由(2)和(2'')式

$$\frac{r}{r'} = 1 - \frac{\Delta t_2}{b}$$

可得

$$r' - r = r' \cdot \frac{\Delta t_2}{b} \quad (16)$$

显然  $\frac{\Delta t_2}{b} \gg \frac{\Delta t_2}{t_F}$ , 且  $r' > r$ ,  $\left[ \begin{array}{c} \rightarrow \\ \text{直达波} \end{array} \right]' > \left[ \begin{array}{c} \rightarrow \\ \text{直达波} \end{array} \right]$ , 则有  $r' \cdot \frac{\Delta t_2}{b} \gg \left[ \begin{array}{c} \rightarrow \\ \text{直达波} \end{array} \right]' \cdot \frac{\Delta t_2}{t_F}$

于是由(16)和(15)式得

$$\boxed{|\Delta r| \gg \Delta \left[ \begin{array}{c} \rightarrow \\ \text{直达波} \end{array} \right]} \quad (17)$$

(17)式表明孕震过程仅对直达纵波有影响时，四震相法表现为正异常，但仍有明显的「放大」波速异常信息的作用。

通过上述常规的单台波速比方法的直达波部分与四震相法之间的理论分析，可得出：在大多数孕震条件下，四震相法具有「放大」波速异常的作用，只是  $\Delta t_1$  在  $\Delta t_2 \left( 1 + \frac{a}{t_F} \right)$

——  $\Delta t_2 (1 - \frac{a}{t_s})$  的较小范围里，四震相方法无「放大」作用或无效（见图8）。

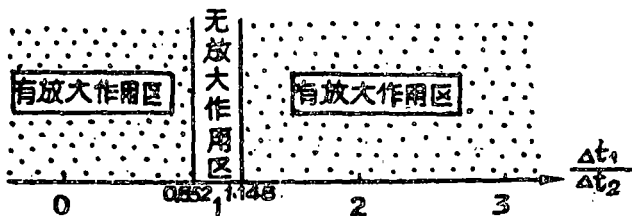


图8

### 与反射波比较

四震相法与常规的单台波速比方法中反射波部分之间的比较，可按同样原理进行：

1. 当  $\Delta t_2 = 0$ ，即  $\eta = \frac{\Delta t_1}{a}$ ，此时孕震体的形状和深度位置使得孕震过程仅对反射纵波施加影响（见图9），由(6)式和(7)式：

$$\frac{1}{\overbrace{\left[ \begin{array}{c} \rightarrow \\ \text{反射波} \end{array} \right]}} - \frac{1}{\overbrace{\left[ \begin{array}{c} \rightarrow \\ \text{反射波} \end{array} \right]}} = \theta = \frac{\Delta t_1}{t_{s11}}$$

$$\frac{1}{r'} - \frac{1}{r} = \eta'' = \frac{\Delta t_1}{a}$$

因  $\eta'' \gg \theta$ ，则

$$\frac{1}{\overbrace{\left[ \begin{array}{c} \rightarrow \\ \text{反射波} \end{array} \right]}} - \frac{1}{\overbrace{\left[ \begin{array}{c} \rightarrow \\ \text{反射波} \end{array} \right]}} \ll \frac{1}{r'} - \frac{1}{r}$$

可化成

$$r' - \overbrace{\left[ \begin{array}{c} \rightarrow \\ \text{反射波} \end{array} \right]} \ll (r - \overbrace{\left[ \begin{array}{c} \rightarrow \\ \text{反射波} \end{array} \right]}) \frac{\overbrace{\left[ \begin{array}{c} \rightarrow \\ \text{反射波} \end{array} \right]} \cdot r'}{\overbrace{\left[ \begin{array}{c} \rightarrow \\ \text{反射波} \end{array} \right]} \cdot r}$$

因  $\Delta t_1 > 0$ ，则  $\overbrace{\left[ \begin{array}{c} \rightarrow \\ \text{反射波} \end{array} \right]} > \overbrace{\left[ \begin{array}{c} \rightarrow \\ \text{反射波} \end{array} \right]}$ ， $r > r'$ ，所以：

$$0 < \frac{\overbrace{\left[ \begin{array}{c} \rightarrow \\ \text{反射波} \end{array} \right]} \cdot r'}{\overbrace{\left[ \begin{array}{c} \rightarrow \\ \text{反射波} \end{array} \right]} \cdot r} < 1$$

于是

$$\Delta_r \gg \Delta \quad \left[ \begin{array}{c} \rightarrow \\ \text{反射波} \end{array} \right] \quad (18)$$

(18)式表明孕震过程仅对反射波有影响时，四震相法有明显的「放大」波速异常的作用。

2. 当  $\Delta t_1 \geq \frac{ts_{11}}{ts_{11} - a} \cdot \Delta t_2$ ，即  $\eta \geq 0$ ，此时孕震体的形状和深度位置使得孕震过程对反射纵波的影响甚大于直达纵波（见图 2），则按同样的方法可求得：

$$\Delta_r > \Delta \quad \left[ \begin{array}{c} \rightarrow \\ \text{反射波} \end{array} \right] \quad (19)$$

(19)式表明四震相法有「放大」波速异常的作用

3. 当  $\Delta t_1 > \Delta t_2 > \Delta t_1 \left(1 - \frac{a}{ts_{11}}\right)$ ，即  $\theta > \eta > 0$ ，此时孕震体的形状和深度位置使得孕震过程对反射纵波的影响略甚于直达纵波（见图 3），则按同样的方法可求得：

$$\Delta \quad \left[ \begin{array}{c} \rightarrow \\ \text{反射波} \end{array} \right] > \Delta_r \quad (20)$$

(20)式表明孕震过程对反射纵波的影响略甚于直达纵波时，四震相法无「放大」作用。

但是，因  $\frac{a}{ts_{11}} \sim 0.129$ ，故出现的可能较小。

4. 当  $\Delta t_1 = \Delta t_2$ ，即  $\theta > \eta = 0$ ，此时孕震体的形状与深度位置使得孕震过程对反射纵波和对直达纵波的影响相等（见图 4），则按同样的方法可得：

$$\left[ \begin{array}{c} \rightarrow \\ \text{反射波} \end{array} \right] > \left[ \begin{array}{c} \rightarrow \\ \text{反射波} \end{array} \right] \quad \text{表现为负异常}$$

$$\Delta_r = 0 \quad (21)$$

(21)式表明此时四震相法不能反映波速异常。不过， $\Delta t_1 = \Delta t_2$  是一极特殊的情况，出现的可能性更小。

5. 当  $\Delta t_1 < \Delta t_2 < \Delta t_1 \left(1 + \frac{a}{ts_{11}}\right)$ ，即  $-\theta < \eta < 0$ ，此时孕震体的形状和深度位置使得孕震过程对反射纵波的影响略小于直达纵波（见图 5），则按同样的方法可得：

$$|\Delta_r| < \Delta \quad \left[ \begin{array}{c} \rightarrow \\ \text{反射波} \end{array} \right] \quad (22)$$

(22)式表明此时四震相法表现为正异常，且无「放大」作用。但是，由于  $\frac{a}{ts_{11}} \sim 0.129$ ，故出现的可能较小。

6. 当  $\Delta t_1 \left( 1 + \frac{a}{t_{s11}} \right) \leq \Delta t_1$ , 即  $\eta \leq -\theta$ , 此时孕震体的形状和深度位置使得孕震过程对反射纵波的影响甚小于对直达纵波的影响 (见图6), 则按类似的方法可求得:

$$\boxed{|\Delta_r| > \Delta} \quad \begin{array}{|c|} \hline \rightarrow \\ \hline \text{反射波} \\ \hline \end{array} \quad (23)$$

(23)式表明此时四震相法虽表现为正异常, 但仍有「放大」波速异常的作用。

由上述分析可见, 在大多数情况下, 四震相波速比法具有「放大」波速异常的作用, 只是  $\Delta t_2$  在  $\Delta t_1 \left( 1 + \frac{a}{t_{s11}} \right) \sim \Delta t_1 \left( 1 - \frac{a}{t_{s11}} \right)$  的较小范围里, 四震相法无「放大」作用或失效 (见图10)

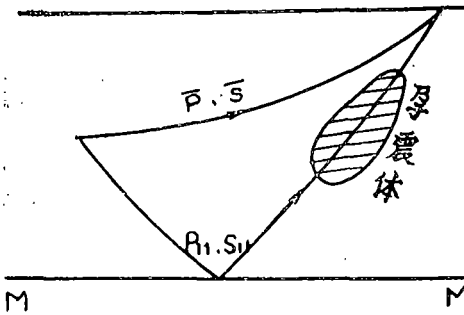


图9

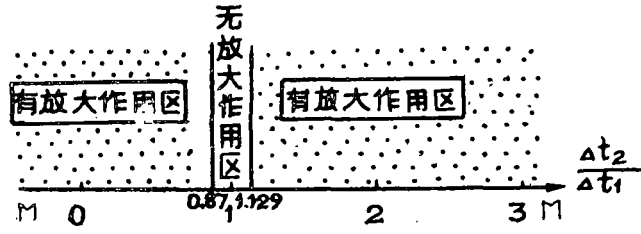


图10

### 讨 论

1. 大多数的情况下, 四震相波速比方法具有「放大」波速异常的优点, 有利于探测和监视地震孕育过程。

2. 四震相法只是在以下范围内:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{直达波: } \Delta t_1: \Delta t_2 \left( 1 + \frac{a}{t_s} \right) \sim \Delta t_2 \left( 1 - \frac{a}{t_s} \right) \\ \text{反射波: } \Delta t_2: \Delta t_1 \left( 1 + \frac{a}{t_{s11}} \right) \sim \Delta t_1 \left( 1 - \frac{a}{t_{s11}} \right) \end{array} \right\}$$

无「放大」作用。然而, 一般对能分辨上述四个震相的90公里附近,  $\frac{a}{t_s} \sim 0.148$ ,

$\frac{a}{t_{s11}} \sim 0.129$ , 故无「放大」作用的范围甚小。

3. 四震相法与常规波速比方法相比较, 有两个优点: ①常规的单台波速比方法使用的是绝对时间, 与时间服务系统密切相关, 而四震相法使用的是相对时间, 与时间系统无关; ②常规方法须考虑发震时刻, 包含[O]的误差, 而四震相法不涉及[O], 故不含此误差。

根据误差理论：

$$\left| \frac{\delta r}{r} \right| = \left| \frac{\varepsilon_1}{P_{11} - \bar{P}} \right| + \left| \frac{\varepsilon_2}{S_{11} - \bar{S}} \right|$$

$$\left| \frac{\delta}{\text{反射波}} \right| = \left| \frac{\varepsilon_3}{P_{11} - [0]} \right| + \left| \frac{\varepsilon_4}{S_{11} - [0]} \right|$$

$$\left| \frac{\delta}{\text{直达波}} \right| = \left| \frac{\varepsilon_5}{\bar{P} - [0]} \right| + \left| \frac{\varepsilon_6}{\bar{S} - [0]} \right|$$

考虑到滚筒不均匀性造成的误差约为0.01秒（滚筒齿轮及轴承打滑等故障性突然误差不包括）；续至震相受扰可能造成±周期的误差为0.03—0.04秒，而常规波速比方法必须计入1秒量级发震时刻误差以及时间服务系统的最大时差0.9秒，可得 $\varepsilon_1 \sim 0.05$ 秒， $\varepsilon_2 \sim 0.08$ 秒， $\varepsilon_3 \sim 1.95$ 秒， $\varepsilon_4 \sim 1.95$ 秒， $\varepsilon_5 \sim 1.91$ 秒， $\varepsilon_6 \sim 1.95$ 秒，滚筒转速为120毫米/分，对于 $\Delta \sim 90$ 公里附近的记录，可得相对误差为：

$$\left| \frac{\delta r}{r} \right| \sim 0.04, \quad \left| \frac{\delta}{\text{反射波}} \right| \sim 0.135, \quad \left| \frac{\delta}{\text{直达波}} \right| \sim 0.221,$$

则绝对误差：

$$\delta r \sim 0.07, \quad \delta \left| \frac{\delta}{\text{反射波}} \right| \sim 0.23, \quad \delta \left| \frac{\delta}{\text{直达波}} \right| \sim 0.38.$$

可见，常规波速比方法的误差较四震相法大。

4. 四震相法具有「放大」波速异常的优点，且该方法还有可回避和达法外推发震时刻所引入的误差和时间系统不统一的误差等优点，但是该方法对震相清晰度和震中距均有所苛求，故值得进一步研究和以更多的震例予以检验。

### 参 考 文 献

[ 1 ] 姜秀娥等，用单台四震相法讨论唐山大震的波速异常，地球物理学报，Vol.24, №1 1981.  
 [ 2 ] 董颂声等，利用人工波源探测震前波速异常，地震学报，Vol. 4, №1, 1982.  
 [ 3 ] 马波，震前波速异常和地震预报——溧阳地震（ $M_s = 6.0$ ）前波速异常，自然杂志 Vol. 2, №4, 1981,

## A PRELIMINARY RESEARCH ON FOUR-PHASE METHOD

Ma Bo

(*Seismological Bureau of Shanghai*)

### Abstract

In this paper the function of four-phase method to amplify the anomaly of seismic velocities ratio is discussed in greater detail than usual method. It reveals that this method is worth researching further and being proved by more seismic examples.

---

## 《华北地震科学》创刊启事

《华北地震科学》是由河北省地震局、山西省地震局、内蒙古自治区地震局联合主办，以报道、交流地震科研成果为主的国内公开发行的综合性学术季刊。主要刊登与地震科学有关的实验、观测、考察、理论和科研成果、问题讨论、防震抗震等方面的论文，以及国内外地震科学研究状况的介绍和评论性文章。

本刊编委会主要由河北省地震局、山西省地震局、内蒙古自治区地震局的科技人员组成，并聘请有关单位的科技人员参加。编辑部设在石家庄市河北省地震局。一九八三年第三季度创刊，每年3.6.9.12月出版。本刊由石家庄市邮局总发行，全国各地邮局均可订购。每期80页，定价0.60元，代号18—21。

本刊读者对象主要是从事地震科研、预报、观测和防震抗震的科技人员及高等院校有关专业的师生。欢迎有关单位和个人积极订阅，踊跃投稿（邮资总付）。

《华北地震科学》编辑部